



Editada por el Centro de Información y Gestión Tecnológica. CIGET Pinar del Río

Vol. 18, No.3 julio-septiembre, 2016

ARTÍCULO ORIGINAL

Diseño de un horno para calentar aire empleando la cascarilla del arroz como combustible

Design of an oven to heat air using the husk of the rice like fuel

Pedro Luis Díaz Navarro¹, Julio Rivero González², Daniel Regalado Nuñez³

¹Ingeniero Mecánico, profesor Asistente de la Universidad de Pinar del Río. Facultad de Ciencias Técnicas. Departamento Mecánica. Martí 270 final, Pinar del Río, Cuba. Teléfono: +53 (48) 728618. CP 20100. Correo electrónico: pedrin@upr.edu.cu

²Ingeniero Mecánico, Máster en Eficiencia Energética, profesor Auxiliar de la Universidad de Pinar del Río. Facultad de Ciencias Técnicas. Departamento Mecánica. Correo electrónico: juliorg@upr.edu.cu

³Ingeniero Mecánico, profesor Instructor de la Universidad de Pinar del Río. Facultad de Ciencias Técnicas. Departamento Mecánica. Correo electrónico: danielreg@upr.edu.cu

RESUMEN

Se realizó el diseño de un horno capaz de calentar el aire empleado en el proceso de secado del grano de arroz, utilizando como combustible la cascarilla del mismo, en la Unidad Económica Básica Industrial Victoria de Girón. Como parte de la metodología empleada se realizaron cálculos de transferencia de calor para determinar el volumen de la cámara de combustión, las dimensiones y características de diseño del intercambiador de calor incluido en el cuerpo del horno; se realizó el balance de masa del proceso de combustión de la cascarilla de arroz y se determinaron los caudales de aire y combustible necesarios para garantizar una combustión estequiométrica. El diseño del horno se comprobó mediante el uso de las aplicaciones AutoCAD y COSMOS DesignSTAR 3.0, las cuales demostraron que las selecciones de materiales, sus resistencias y la dimensionamiento del horno están dentro de un rango aceptable.

Palabras clave: Hornos incineradores, Cascarilla de arroz, Proceso de secado.

ABSTRACT

As carried out the design of an oven able to heat the air used in the process of drying of the grain of rice, using as fuel the husk of the same one, in the Industrial Basic Economic Unit Victoria of Girón. As part of the calculation methodology used for furnace design are

discussed. Heat transfer calculations were performed to determine the volume of the combustion chamber and the dimensions and design characteristics of the heat exchanger included in the furnace body; the mass balance of the combustion process of rice hulls was performed and the flows of air and fuel required were determined to ensure stoichiometric combustion. The furnace design was tested using the AutoCAD applications and COSMOS DesignStar 3.0, which demonstrated that the selections of materials, their strengths and sizing of the furnace are within an acceptable range.

Key Words: Furnace, Rice husk, Drying process

INTRODUCCIÓN

En América Latina y el Caribe el arroz es, como en el resto del mundo, una de las fuentes más importantes de calorías y proteínas, se producen treinta millones de toneladas de arroz en siete millones de hectáreas anualmente, con un rendimiento promedio de tres t/ha cultivada (Pedrera, Díaz Solís, Morejón Rivera, & Ipsán Pedrera, 2013). El proceso productivo del arroz se puede desglosar en varias etapas, siendo el secado de la masa de granos, la de mayor influencia en la calidad final del producto, así como en los costos debido al consumo de combustibles y electricidad (Arrastía Acosta, Santos Guerra, Castillo Toro, & Hernández López, 2013). En este sector industrial los principales portadores energéticos empleados son el diésel y la energía eléctrica, constituyendo en algunos Secaderos del país el 69,98% y 29,60% del total de consumo energético respectivamente; dejando tan solo un 0,42% para portadores como el aceite lubricante y las grasas (Díaz Navarro, 2014). Por tales motivos se hace necesaria la implementación de alternativas viables para sustituir estos portadores por otras fuentes de energía que puedan garantizar las condiciones indispensables para llevar a cabo el secado del grano con iguales o mejores índices de calidad, elevando de esta manera la Eficiencia Energética de dicha actividad. La cascarilla de arroz es uno de los desechos más importantes de la producción de este cereal. La cantidad de cascarilla que se genera, año tras año en Cuba puede superar las 736 200 000 t/año, con el agravante de que por su baja degradabilidad natural, se acumula en el ambiente, generando situaciones extremas de contaminación. Una propiedad química de importancia en la cascarilla del arroz lo constituye su poder calorífico el cual en relación con el peso en seco de la misma varía entre los 13,9 MJ/kg y 16,2 MJ/kg (3 320,98 kcal/kg y 3 870,5 kcal/kg respectivamente). Las variaciones en estos valores obedecen a diferentes contenidos de ceniza e impurezas producidas por la película aceitosa de la aleurona (Kerneur, 1992). Esta última propiedad hace que la misma sea una fuente viable para la obtención de energía calorífica mediante su combustión. Por tales motivos, se hace necesario la invención de nuevos equipos (hornos) que cumplan con los requerimientos básicos para obtener dicha energía y emplearla en los diferentes procesos productivos. Las condiciones para llevar a cabo investigaciones relacionadas con este tema están creadas en la Unidad Económica Básica Industrial Victoria de Girón. Esta

industria de la provincia de Pinar del Río, Cuba, se dedica fundamentalmente al secado y molinado del grano de arroz luego de su recolección. En la misma los altos volúmenes de acumulación de la cascarilla constituyen un problema ambiental real, por lo que la alternativa de quemar la misma en un horno destinado para este fin y emplear el calor para calentar el aire del proceso de secado es una opción satisfactoria desde el punto de vista energético y de protección del medio ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

El cálculo de los indicadores termodinámicos del horno es la base fundamental para determinar los parámetros del diseño físico del mismo, entiéndase por estos: volumen de la cámara de combustión, tipo de intercambiador de calor y la estructura del mismo.

Teniendo en cuenta que la temperatura de trabajo de este equipo estará en el rango comprendido entre los 450°C y los 490°C (determinada esta porque es el rango ideal para la combustión de la cascarilla de arroz) y la potencia de generación esperada será menor a los 290 kW/m³ se empleará un horno con tecnología de parrilla en su cámara de combustión, esta decisión está avalada por la consulta de bibliografías especializadas.

Partiendo de este planteamiento la metodología para el cálculo de los diferentes parámetros del horno es la siguiente:

Determinación del volumen de producto a secar.

$$V=m/\delta \text{ [1]}$$

En dicha ecuación:

V _ Volumen del arroz cáscara (m³)

m _ Masa del arroz cáscara (kg)

δ _ Densidad aparente del arroz cáscara (kg/m³)

Cálculo de la cantidad de agua a remover de los granos en una pasada.

El porciento de humedad con que el arroz cáscara entra del campo al secadero según bibliografía previamente consultada (Unión de Empresas Arroceras (UCAIA), 1988) y con el objetivo de diseñar para las peores condiciones de explotación se considera que es de un 30%.

$$m_w=m_m \cdot (\phi_i - \phi_f) / 1 - \phi_f / 100 \text{ [2]}$$

En dicha ecuación:

m_w _ La cantidad de agua a remover (kg)

m_m _ Masa de granos a secar (kg)

\emptyset_f _ Humedad final del arroz

Cálculo del calor requerido en la torre de secado.

El calor requerido (Q_r) en la torre de secado es la cantidad de calor necesario para disminuir la humedad del arroz cáscara teniendo en cuenta las posibles pérdidas que se puede tener en esta sección. La ecuación [3] es la empleada para calcular este parámetro.

$$Q_r = Q_{\text{útil}} + Q_{pp} + Q_{ps} \quad [3]$$

En la misma:

Q_{pp} _ Calor perdido en las paredes de la misma torre de secado y los conductos que transportan el aire caliente desde el horno hasta la torre.

Q_{ps} _ cantidad de calor que es desaprovechado por el aire que sale al ambiente después del secado.

Calor útil en la torre de secado ($Q_{\text{útil}}$):

$$Q_{\text{útil}} = Q_s + Q_l \quad [4]$$

La ecuación [5] relaciona los parámetros para determinar el calor sensible del arroz cáscara.

$$Q_s = \dot{m}_{ac} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad [5]$$

En la misma:

Q_s _ Calor sensible del arroz cáscara (W)

\dot{m}_{ac} _ Flujo másico del arroz cáscara (kg/s)

C_p _ Calor específico del arroz cáscara (Boizán & Zhidko, 1986). (kJ/kg°C)

ΔT _ Variación de temperatura ($T_s - T_a$)

T_s _ Temperatura del secado (°C)

Ta _ Temperatura del ambiente (°C)

La ecuación [6] relaciona los parámetros para determinar el calor latente del arroz cáscara.

$$Q_l = m_w \cdot h_{fg} \quad [6]$$

En la misma:

Q_l _ Calor latente del arroz cáscara (kJ)

m_w _ Masa de agua a removerse (kg)

h_{fg} _ Calor de vaporización del agua (kJ/kg)

Pérdidas de calor en la torre de secado (Q_{pp}):

Las pérdidas de calor en la torre de secado se dan por las paredes del mismo. Teniendo en cuenta el tipo de material de la torre y su conductividad térmica, la velocidad del viento de la zona entre otros parámetros se puede definir estas pérdidas como se muestra a continuación.

- Coeficiente de conversión interna en la torre de secado.

Este se determina con la ecuación [7], como se muestra a continuación:

$$h_i = N_u \cdot k / D \quad [7]$$

Donde:

h_i _ Coeficiente de convección (W/m²K)

K _ Coeficiente de conductividad de la superficie en contacto (W/mK)

D _ Diámetro del conducto (m)

N_u _ Criterio de Nusselt

En este caso, como el conducto es de sección rectangular y no circular, se remplace el diámetro D con un diámetro equivalente más conocido como el radio hidráulico RH. Este parámetro es calculado por las fórmulas de Huebscher [8] y [9]:

$$RH = 1,3 \cdot (a \cdot b)^{5/8} / (a + b)^{1/4} \quad [8]$$

$$RH=4A/P_m \text{ [9]}$$

En las mismas:

a _ Ancho del conducto (m)

b _ Largo del conducto (m)

A _ Área de la sección (m²)

P_m _ Perímetro de la sección rectangular (m)

El criterio de Nusselt depende del número de Reynolds que se determina por la ecuación [10] (Incropera et al. p. 343).

$$Re=V_s \cdot RH/v_s \text{ [10]}$$

En esta:

V_s _ La velocidad del aire caliente para el secado (m/s)

v_s _ La viscosidad del aire caliente para el secado (m²/s)

Cuando:

$$Re < 10,000 \quad Nu = 0,66 \cdot Re^{0,5} \cdot P_{rf}^{0,3} \text{ (Flujo laminar)}$$

$$Re > 10,000 \quad Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot P_r^{0,4} \text{ (Flujo turbulento)}$$

- Coeficiente de convección externa en la torre de secado.

$$h_o=2,8 \cdot 3V_a \text{ [11]}$$

Donde V_a es la velocidad del viento de la zona donde está el secadero y h_o el coeficiente de convección externa (W/m²K).

- Coeficiente global de transferencia de calor en la pared de la torre de secado.

$$U_o=1/(R_1+R_2+R_3) \text{ [12]}$$

Donde:

R₁_ Resistencia convectiva interna.

R_2 Resistencia debido a la lámina de acero.

R_3 Resistencia convectiva externa.

Para después determinar las pérdidas de calor a través de las paredes de la torre de secado utilizando la ecuación [13].

$$Q_{pp} = U_o \cdot A_t \cdot (T_h - T_a) \quad [13]$$

Donde:

A_t Es el área de la torre de secado (m^2)

T_h La temperatura máxima dentro de la torre ($^{\circ}C$)

T_a La temperatura del ambiente ($^{\circ}C$)

Pérdidas de calor por la salida de aire utilizado en el secado (Q_{ps}):

$$Q_{ps} = \dot{m}_a \cdot C_p \cdot \Delta T \quad [14]$$

Donde:

\dot{m}_a Flujo de aire necesario para el secado (kg/s)

C_p Calor específico del aire (kJ/kg $^{\circ}C$)

ΔT Diferencia de temperatura entre la salida de la torre y el ambiente ($^{\circ}C$)

Calor requerido para el proceso de secado.

Finalmente se tiene que el calor requerido para el proceso de secado es la suma del calor requerido por la torre de secado y las pérdidas de calor en las paredes del horno.

$$Q_{req} = Q_{tbs} + Q_{pcc} + Q_{pic} + Q_{pchim} \quad [15]$$

Calor entregado a un tubo del intercambiador.

El calor que se debe entregar a un tubo del intercambiador de calor es conocido también como el calor útil en el tubo y es el calor necesario para lograr la variación de la temperatura del aire que circula por el interior del mismo:

$$Q_{tb} = Q_{req} / [U_d \cdot A_{tb} \cdot (T_m - T_a) \cdot N] \quad [16]$$

Donde:

T_m _ Temperatura del aire calentado ($^{\circ}\text{C}$)

T_a _ Temperatura del ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

A_{tb} _ El área lateral de transferencia de calor en un tubo (m^2)

N _ Número de tubos

Cálculo del flujo de combustible.

$$\dot{m}_{ca} = Q_{req} / \text{PCI}_{ca} \quad [17]$$

Cantidad de aire necesario para la combustión (A_{real}).

$$A_{real} = n \cdot A_{min} \quad [18]$$

Donde:

n _ Exceso de aire (valor fijado para el uso de combustibles sólidos en Cuba).

$$A_{min} = 8,89 \{ W_c + 3[(W_o - W_s)/8] \} \quad [19]$$

Donde:

Los valores W_x son los valores del análisis gravimétrico de cada sustancia que forma parte del combustible.

Volumen de la cámara de combustión.

El volumen de la cámara de combustión se tiene como la suma del volumen de los gases proveniente de la quema (V_g), lo cual se determine como el volumen de gases producido por cada kW de calor producido por el calor generado en la cámara de combustión y el volumen de la ceniza de la combustión ($V_{cenizas}$).

$$V_{cc} = V_g + V_{cenizas} \quad [20]$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta los resultados enunciados en la *tabla*, el horno tendrá la siguiente estructura.

Tabla. Resultados de los principales indicadores termodinámicos empleados en el diseño del horno.

Indicadores termodinámicos del horno	Valor
Volumen de producto a secar en cada caso	107,4 m ³
Cantidad de agua a remover de los granos en una pasada	9428,57 kg
Calor requerido en la torre de secado	7725,68 kW
Calor requerido para el proceso de secado	7967,52 kW
Calor entregado a un tubo del intercambiador	511,36 kW
Flujo de combustible	1878,27 kg/h
Cantidad de aire necesario para la combustión	9015,7 m ³ /h
Volumen de la cámara de combustión	0,9604 m ³

El intercambiador de calor.

Tomando como punto de partida el espacio con que se dispone en el interior de las torres de secado de la Unidad Económica Básica Industrial Victoria de Girón para la ubicación del horno y pensando en dejar una holgura que permita la movilidad de los operarios del equipo con el fin de realizar las diferentes acciones de mantenimiento se determinó que la longitud y el ancho del horno sean 1m y 1,372m respectivamente. La altura del intercambiador de calor es de 1,93m y el mismo estará conformado por 114 tubos con diámetro interior de 77mm. Con tales dimensiones el aire dará tres pases por el interior del intercambiador como se muestra en la *figura 1a*.

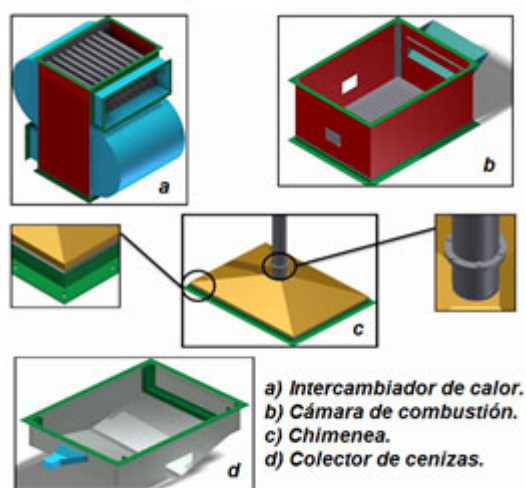


Figura 1. Partes del Horno.

Este tipo de intercambiadores de tubo y coraza es muy empleado en la actualidad debido a su alta eficiencia, por lo que el diseño del horno en este sentido se acoge a las normativas internacionales de seguridad y eficiencia (Trinks & Mawhinney, 1975).

La cámara de combustión.

La cámara de combustión del horno emplea la tecnología de parilla, tecnología que facilita el trabajo con combustibles sólidos, como bien plantea ya tiene predeterminadas las dimensiones longitud y ancho acorde con el intercambiador de calor. Teniendo en cuenta el volumen final de la misma se tiene un valor de altura de 0,7 m. Esta se diseñó con tecnología de parilla teniendo en cuenta fundamentalmente las temperaturas de trabajo del horno, esto está acorde con lo recomendado en varias bibliografías especializadas en el tema (Castellanos Lozano, 2013) y además facilita la extracción de las cenizas. La *figura 1b* muestra la estructura de la misma.

Accesorios y diseño final del horno.

El horno además estará compuesto por accesorios tales como: la chimenea (*figura 1c*) y el colector de cenizas (*figura 1d*). Importante es la propuesta de un colector de cenizas húmedo, ya que el tamaño granulométrico de la ceniza obtenida de la combustión de la cascarilla de arroz es muy pequeño, lo que hace posible la volatilidad de la misma y por consiguiente constituye un peligro para la salud de los operarios del equipo, pues esta se deposita en los pulmones causando daños severos a estos órganos.

Es válido aclarar que dadas las dimensiones de este equipo el mismo es compatible con instalaciones de secado de la marca **STEIN**. Quedando conformada una propuesta de diseño inicial para el mismo como se muestra en la *figura 2*.

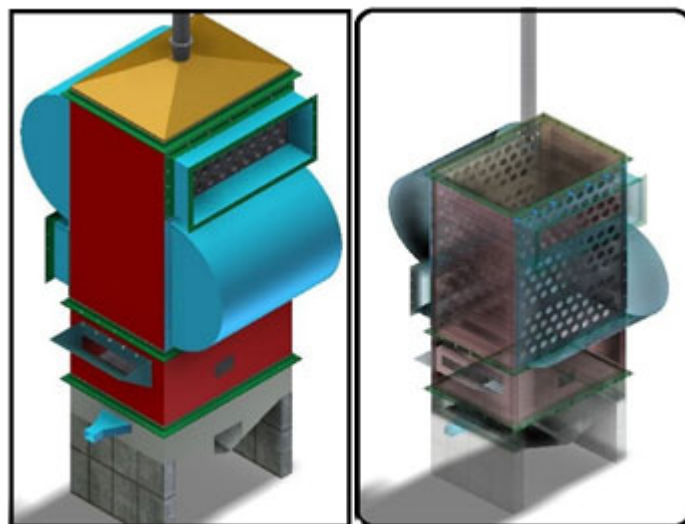


Figura 2: Propuesta de diseño final del horno.

Impactos económicos del empleo del horno.

Con el empleo del horno para calentar el aire del proceso de secado del arroz se disminuye el uso de uno de los portadores energéticos más consumidos en esta actividad, es el caso del diésel. Teniendo en cuenta los costos preliminares de fabricación del equipo,

entiéndase costos en materiales y costos en mano de obra, el gasto por concepto de fabricación del horno asciende a un monto de 4495,76 CUC y 132,78 CUP. Valores estos que se recuperan en un día de explotación del equipo teniendo en cuenta que el costo diario por consumo de diésel para el secado del arroz es de 6624,15 CUC. Por lo que el empleo de este equipo durante el período de cosecha del grano se traduce en un ahorro de 591677,74 CUC.

Impactos medioambientales.

El empleo de este equipo sustituye el uso del quemador de diésel instalado en la torre de secado. Teniendo en cuenta el flujo de diésel necesario para secar el grano de arroz en una jornada de trabajo se determinó que las emisiones de CO₂ a la atmósfera por esta actividad son del orden de los 13600 kg. Por otra parte el mismo proceso, empleando como combustible la alternativa de la cascarilla de arroz genera emisiones diarias del orden de los 864 kg. Por lo que se puede comprobar que empleando el horno diseñado se dejan de emitir diariamente a la atmósfera cerca de 12736 kg de CO₂. Teniendo esto un impacto positivo sobre el medio ambiente, ya que anualmente se dejarían de emitir 1146,24 t de CO₂ a la atmósfera.

CONCLUSIONES

- Los resultados del trabajo permitieron comprobar que es factible la idea de diseñar un horno que emplee como combustible la cascarilla de arroz para el proceso de secado de dicho grano.
- En el mismo se definieron los valores de los parámetros de diseño fundamentales que garanticen el funcionamiento eficiente de dicho equipo.
- Se comprobó que esta propuesta es una alternativa viable desde el punto de vista económico y medioambiental, generando ahorros considerables en ambos aspectos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arrastía Acosta, M., Santos Guerra, I., Castillo Toro, D., & Hernández López, A. A. (2013). *Evaluación del proceso de secado de arroz en Cuba*. La Habana: Instituto de investigaciones del Arroz.
- Boizán Jústiz, M.A., & Zhidko, V.I. (1986). *Secado fluidizado de productos alimenticios*. Santiago de Cuba: Oriente.
- Castellanos Lozano, E.H. (2013). Eficiencia energética en sistemas de producción de arroz de purificación. *Scientia Agroalimentaria*, 1, 33-38.
- Díaz Navarro, P.L. (2014). *Gestión Energética Empresarial en la "Unidad Económica Básica Industrial Victoria de Girón"*. Pinar del Río.

- Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine. (s.f.). *Fundamental off Heat and Mass Transfer* (sexta ed.). Magraw Hill.
- Kerneur, S. (1992). *Obtención de gases combustibles por porólisis a partir de la cascarilla de arroz*. (Tesis de grado). Bogotá.
- Pedrera, D.I., Díaz Solís, S.H., Morejón Rivera, R., & Ipsán Pedrera, N. (2013). Influencia de la temperatura del grano, durante el proceso de secado, en la calidad del arroz blanco. *Revista Avance*, 15(4), 394-405.
- Unión de Empresas Arroceras (UCAIC). (1988). *Instructivo Técnico para la Industria Arroceras*. La Habana: Centro de Información y Documentación Agropecuaria.
- Trinks, M., & Mawhinney, M. (1975). *Hornos Industriales I, II*. Urmo S.A.

Recibido: abril 2016

Aprobado: agosto 2016

Ing. Pedro Luis Díaz Navarro. Profesor Asistente de la Universidad de Pinar del Río. Facultad de Ciencias Técnicas. Departamento Mecánica. Martí 270 final, Pinar del Río, Cuba. Teléfono: +53 (48) 728618. CP 20100. Correo electrónico: pedrin@upr.edu.cu